

(14)

320-324

大跨度钢管混凝土拱桥的地震反应性能

郑史雄 周述华

(西南交通大学 土木工程学院 成都 610031)

丁桂保

(西南交通大学 应用力学与工程系 成都 610031)

U448.22

U448.34

摘 要 针对跨径为 $(76+360+76)\text{m}$ 的某大跨度钢管混凝土系杆拱桥的特点,详细介绍了其分析模型的建立方法、动力特性特点及其在地震动作用下的响应,并深入讨论了不同行波波速对该拱桥地震反应性能的影响。分析表明,主拱肋跨中截面的地震反应内力较小,而拱脚截面和 $1/4\sim 3/8$ 等截面的地震反应内力则相对较大。行波效应对拱桥的地震反应有较大的影响,一般来说考虑行波效应后其竖向位移、轴力均增大,而横向位移则减少。

关键词 拱桥;地震反应分析;行波效应;钢管混凝土

分类号 U442.55

拱桥以其经济、美观深得人们的喜爱,在我国应用十分广泛。近年来,随着钢管混凝土等技术的发展,拱桥的跨度也逐渐加大。我国在建的钢管混凝土拱桥的跨度已达到 420m ,拟建的钢管混凝土系杆拱桥跨径也达 360m ,均属世界上同类拱桥中跨径为最大的拱桥。

大跨度拱桥的抗震性能,尤其钢管混凝土拱桥,现行规范尚无明确的规定,从有关桥梁抗震的文献看,涉及到大跨度钢管混凝土拱桥地震性能的十分少,这说明这类桥梁的地震反应性能的研究还有许多工作要做,文献[1]针对几座特定的拱梁作了一些简要介绍,很有参考价值和实际意义,本文中则以某大跨度钢管混凝土系杆拱桥为分析对象,详细分析讨论其动力特性、地震反应性能,旨在给大跨度拱桥抗震设计提供参考。

1 动力分析模型的建立

某钢管混凝土系杆拱桥,跨径组合为 $76\text{m}+360\text{m}+76\text{m}$,主跨两拱脚中心之间的水平距离为 344m 。桥道板置于横梁上,横梁由吊杆或立柱支撑,吊杆、立柱的间距均为 4m ,桥面总宽(按横梁长度计) 38.0m ,高度(包括钢横梁高度)为 2.27m 。该桥两主拱肋相对跨中截面对称,但桥面标高略有不对称,如图1中左低右高,主跨两拱脚上方桥面处均设有伸缩缝。

采用有限元方法对该桥进行离散简化,用作者自行研制的桥梁结构分析软件 SEISAP^[2]进行分析计算。在离散时,为了简化计算,考虑到弦杆与平联板已连接为一体,因而将三根弦杆与平联板一并作为一梁单元处理。上下弦杆之间的腹杆也合成一梁单元,而主拱肋的横撑杆、横梁、立柱、边拱肋、边墩等分别采用梁单元离散,吊杆、系杆等用杆单元来模拟,桥面板用板单元来离散,经对全桥离散后,梁单元共 $1\,841$ 个,杆单元共 390 个,三角形板单元 $1\,024$ 个,节点

收稿日期:1998-09-2 郑史雄:男,1965年生,副教授,博士。

总数为 1 263 个。其有限元离散图如图 1 所示。

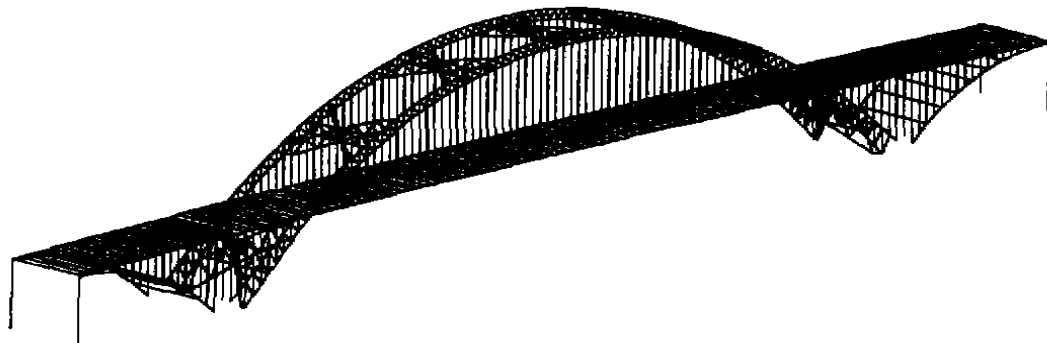


图 1 全桥有限元离散图

在进行有限元离散时,作如下考虑。

(1) 拱桥的主拱肋是钢管混凝土杆及钢管组成的杆系结构。钢管混凝土杆由钢与混凝土两种材料组合而成,在计算时一般可有两种方法来处理。一种方法是将钢管和混凝土作为两根杆件计算,保证其节点坐标相同,另一种方法是将钢和混凝土换算成一种材料来计算。本文中采用第二种方法计算。

如将钢管混凝土截面换算为相当的混凝土截面,则相当截面的抗拉压刚度为 $EA = E_c(A_c + nA_s)$, 抗弯刚度为 $EI = E_c(I_c + nI_s)$, 抗扭刚度为 $GI_p = G_c(I_{pc} + n'I_{ps})$ 。其中: $n = E_s/E_c$; $n' = G_s/G_c$; E 为弹性模量; G 为剪切模量; I 为惯性矩; I_p 为扭转惯矩; A 表示截面积;下标 s 表示钢材;下标 c 表示混凝土。

值得一提的是,由于钢管混凝土的力学性能十分复杂,以上方法并非十分精确,但方便易行且偏于安全,尤其是在弹性范围内工作时。

(2) 对于长大跨度柔性拱桥来说,分析计算时应考虑系杆、拱肋等的初始轴力对刚度矩阵的影响^[3]。由于该桥立柱或吊杆的纵向间距仅 4 m,而主拱肋宽有 3.45 m,相应的梁单元是一短深梁,其剪切变形的影响也应予以考虑^[4]。

(3) 由于桥面板是支承在横梁上,桥面板中心线与横梁轴中心线不重合,因而在有限元离散时,如简单地采用相同节点来连接板单元与梁单元必然会带来误差,为解决此问题,采用如下办法处理,即将板节点与横梁节点用刚臂相连,刚臂长度等于横梁轴中心线与板中心面之间的距离。为减少计算量,节点编号时横梁节点可不编号,求出梁单元刚度和质量矩阵后,通过坐标变换成对应板节点自由度的梁单元刚度矩阵^[4],然后与板单元刚度矩阵一起组成总刚度矩阵。另外,桥面在主拱与边拱交界处设置有伸缩缝,因此,计算分析时应将此处板单元断开。假定边墩底固定,边拱肋、主拱肋和立柱在拱脚处均固定约束,不考虑土与结构的相互作用。

2 分析结果

2.1 桥梁动力特性

桥梁结构动力特性是进行桥梁动力分析的基本资料,因此首先对该桥的动力特性作了分析计算,分析结果如表 1 所示。

表1 桥梁结构前十四阶振型

阶次	振型主要特点	频率/Hz	阶次	振型主要特点	频率/Hz
1	主拱肋对称侧倾	0.330 8	8	边拱侧倾	0.654 4
2	主拱肋纵向桥面竖向挠曲	0.442 8	9	主拱对称竖向挠曲	0.743 5
3	主拱肋桥面反面对称侧倾	0.514 6	10	边拱侧倾	0.785 2
4	主拱肋反对称侧倾	0.562 5	11	边拱侧倾	0.823 2
5	边拱竖向挠曲	0.564 1	12	主拱桥面对称扭转	0.949 4
6	边拱竖向挠曲	0.586 4	13	主拱桥面反面对称扭转	0.970 4
7	边拱侧倾	0.622 4	14	主拱反对称竖向挠曲	1.091 4

2.2 同步激励下地震反应

地震反应分析输入地震波采用一组实测的 El-centro 波,其最大水平加速度调整为 $0.2g$,最大竖向加速度调整为 $0.12g$ 。并假定地震动的主轴与桥梁纵、横、竖三轴重合。地震动输入沿桥纵向、横向、竖直三个方向同时输入。不考虑地基土与桥梁基础的动力相互作用的影响。桥梁结构的阻尼系数取 2%。分析得出拱圈中心最大地震反应位移沿桥梁纵轴向的变化如图 2 所示,桥面中心地震反应最大位移沿桥梁纵轴向的变化如图 3 所示。

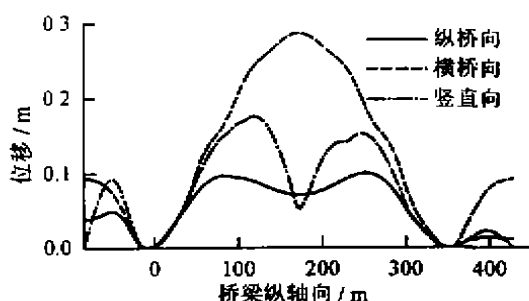


图2 拱肋中心点最大地震反应位移
沿桥纵轴向变化

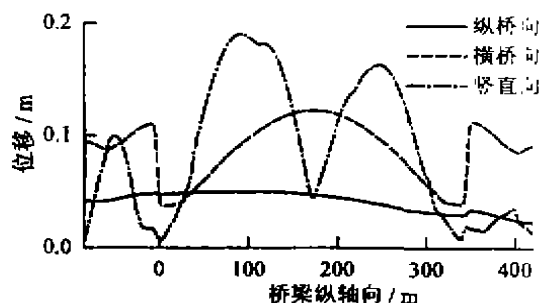


图3 桥面中心点最大地震反应位移
沿桥纵轴向变化

由图 2 和图 3 可见,在拱肋各截面的最大地震反应位移中,横桥向最大位移发生在主拱拱顶,为 0.286 m ,纵桥向最大位移发生在主拱 $l/4$ 截面,为 0.099 m ,竖向向最大位移发生在约 $3l/8$ 跨截面处,为 0.175 m 。桥面中心最大横向位移仍发生在跨中,为 0.122 m ,但注意到中跨拱脚上方桥梁伸缩缝处横向位移有突变。最大竖向位移则发生在约 $l/4$ 跨处,为 0.190 m 。图 2 和图 3 两图的变化规律可由其前几阶振型特点得到解释。

图 4 为主拱拱圈弦杆轴力沿桥纵轴向的变化图。由图可见轴力最大值发生在拱脚处,且为 $18.17 \times 10^3\text{ kN}$ 或约 $l/4$ 跨处,为 $17.48 \times 10^3\text{ kN}$,而跨中截面的轴力则最小,仅约 $5.0 \times 10^3\text{ kN}$ 。另外,经分析可得主拱圈弦杆横向挠曲弯矩最大值发生在主拱圈与桥面相交

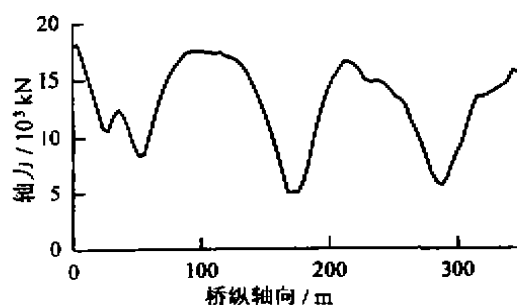


图4 主拱上弦杆轴力最大地震反应沿桥轴向变化

处,为 $16.54 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$,其次为主拱拱脚截面,为 $14.24 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$,而剪力及竖向挠曲弯矩则均较小,这说明该桥主拱轴线设计对抗震来说也是合理的。

图5和图6分别给出了主拱顶位移反应和两典型截面轴力的反应时程,比较图5和图6可得,拱桥在各方向上的最大位移反应主要受其主方向上的基频控制,而截面上的最大轴力反应则不是如此,明显有多阶频率的贡献组合而成。

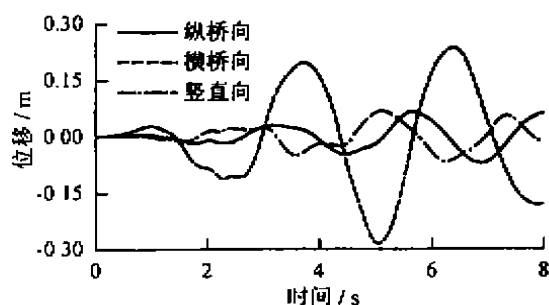


图5 主拱顶位移最大地震反应时程

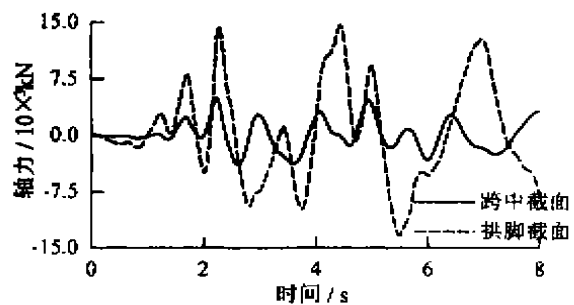


图6 两典型截面轴力最大地震反应时程

2.3 行波效应对地震反应的影响

为了解行波效应对地震反应的影响,本文还计算分析了三种不同行波波速下该桥的地震反应^[5]。为便于比较,分析时仍采用上述地震波输入。具体结果见表2,表中 N 表示主拱弦杆轴力, M_z 表示主拱弦杆横向挠曲弯矩。

表2 不同波速时各典型截面的内力和位移反应

分 项		$v/(\text{m/s})$		同步激励
		500	1 000	
拱	主拱脚 $N(\times 10^3 \text{ kN})$	25.65	18.14	18.17
肋	主拱脚 $M_z(\times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m})$	16.39	16.12	13.75
最	1/4 主跨处 $N(\times 10^3 \text{ kN})$	13.92	20.0	17.44
大	1/4 主跨处 $M_z(\times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m})$	5.90	6.61	7.02
内	主跨跨中 $N(\times 10^3 \text{ kN})$	12.92	7.82	5.10
力	主跨跨中 $M_z(\times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m})$	2.13	3.24	3.43
反	主拱最大 $N(\times 10^3 \text{ kN})$	25.65	24.76	18.17
应	主拱最大 $M_z(\times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m})$	17.81	16.12	16.54
最	主拱顶横向位移/m	0.178	0.253	0.286
大	主拱顶竖向位移/m	0.102	0.063	0.049
位	边拱顶横向位移/m	0.091	0.093	0.094
移	跨中桥面横向位移/m	0.087	0.118	0.122
反	跨中桥面竖向位移/m	0.091	0.058	0.049
应	桥面最大竖向位移/m	0.081	0.086	0.089

由表2可见,考虑行波效应后,主拱肋最大轴力、主拱脚轴力、跨中轴力均有较大幅度的增加,而最大横向挠曲弯矩却变化不大,不同波速时或有增加或有减少,不同截面处也有增有减。主拱肋最大内力(包括轴力和横向挠曲弯矩)的位置也随波速不同有所不同, $v = 1\,000 \text{ m/s}$ 时最大轴力发生在 $1/4$ 跨处,而非拱脚。 $v = 500 \text{ m/s}$ 和同步激励时的最大横向挠曲弯矩也均非

在拱脚。考虑行波效应后,各典型截面的横向位移均减少,且波速越小,位移越小。而竖向位移却是增加,且波速越小,位移越大。

3 结 论

(1) 拱脚截面在地震作用下是危险截面,但也应注意到在 $l/4 \sim 3l/8$ 处主拱肋截面的轴力也相当大,在设计时这应引起注意。

(2) 桥梁伸缩缝对大跨度桥梁是必要的,但应注意伸缩缝的抗震设计。

(3) 考虑行波效应后横向位移会减少,竖向位移却是增加。主拱肋最大轴力明显增加,而最大横向挠曲弯矩却变化不大。因而,在对该类大跨度拱桥进行抗震设计时应注意考虑行波效应。

参 考 文 献

- 1 范立础.桥梁抗震.上海:同济大学出版社,1997:176~204
- 2 郑史雄.长大跨度桥梁的地震反应分析.博士学位论文.西南交通大学,1996
- 3 项海帆,刘光栋.拱结构的稳定与振动.北京:人民交通出版社,1991:124~144
- 4 Weaver W J, Johnston P R. Structural dynamics by finite element. Inc. Englewood Cliffs. New Jersey: Prentice-Hall, 1996:411~443
- 5 郑史雄,奚绍中.大跨度刚构桥的地震反应分析.西南交通大学学报,1997;32(6):586~592

The Seismic Response Behavior of Long Span CFST Arch Bridge

Zheng Shixiong Zhou Shuhua

(School of Civil Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Ding Guibao

(Dept. of Appl. Mech. and Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract A seismic response model of long span concrete filled steel tube (CFST) arch bridge is set up. Taking a bridge of $76 + 360 + 76$ m span concrete filled steel tube tied arch bridge as an example, the seismic response behavior is systematically studied. The results show that in the apex of arch the response member forces are low, while response horizontal displacement is maximum, forces in the springing of main arch rib are relatively large, and the non-synchronous support motion due to the traveling seismic wave may have a significant effect on the response. They tend to increase the axial-force of arch rib and vertical displacement and decrease the horizontal displacement.

Key words arch bridge; seismic response analysis; the effect of traveling seismic wave; concrete filled steel tube;